

# **Relação entre intensidade, duração e frequência de chuvas em Rio Claro, SP: métodos e aplicação**

## **Intensity, duration and frequency rainfall relation in Rio Claro, SP: methods and appliance**

**Rodrigo Braga Moruzzi**

*Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento- IGCE – UNESP, Rio Claro, SP.  
e-mail: rmoruzzi@rc.unesp.br*

**Samuel Conceição de Oliveira**

*Departamento de Petrologia e Metalogenia - IGCE – UNESP, Rio Claro, SP.  
e-mail: scoliv@rc.unesp.br*

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo a obtenção da equação de intensidade-duração-frequência (IDF) para o município de Rio Claro, SP. Para tal, foram analisados os dados pluviométricos disponíveis nos quatro postos localizados na área do município. Preliminarmente, foram obtidas as séries de máximas alturas médias para chuva de 1 dia ( $h_{\text{dia,max.}}$ ). Posteriormente, foram verificados os ajustes de distribuições teóricas de probabilidade aplicando os métodos de Foster e Gumbel e obtidas as chuvas  $h_{\text{dia,max}}$  para diferentes períodos de recorrência (2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos). O Método das Relações das Durações foi utilizado para desagregação da chuva de 1 dia. A equação de chuva intensa foi obtida por meio do ajuste empregando a regressão não linear dos dados por meio do algoritmo de Marquardt. Finalmente, os resultados foram comparados com a IDF de Piracicaba. Os resultados indicam que a equação pode ser utilizada na quantificação de chuvas intensas em projetos de engenharia no município de Rio Claro.

**ABSTRACT:** The main aim of this paper was to obtain the intensity-duration-frequency rainfall equation to Rio Claro, SP, Brazil. For such objective, the four pluviometric station data available in the municipal area were analyzed. Firstly, the average maximum series for one day were determined. After, the probabilistic theoretical adjustment was applied using Foster and Gumbel methods and so the maximum rainfall for different return period (2, 5, 10, 20, 50, 100 and 500 years) was calculated. The Duration Relation Method was applied to disaggregate the one-day rain. The rain equation was calculated by mean of data non-linear adjustment using the Marquardt algorithm. Finally, the results obtained by the suggested equation were compared with the ones obtained by the known Piracicaba, SP equation. The results indicate that the proposed equation can be used to quantify the rain flow for engineering projects at Rio Claro, SP, Brazil.

### **1. INTRODUÇÃO**

A obtenção das vazões de projeto para diferentes durações e períodos de recorrência é de grande importância em projetos de engenharia.

Nos projetos de canalização, o parâmetro mais importante a considerar é a vazão de projeto, ou seja, o pico dos deflúvios associado a uma precipitação crítica e a um determinado risco assumido. Portanto, outras precipitações que levem a picos de vazão menores serão sempre conduzidas com segurança pelo sistema existente ou projetado.

Ou seja, o volume de cheias, associado às diferentes precipitações, passa a ter interesse secundário [1]. Chuvas intensas são aquelas que provocam cheias no sistema de drenagem, gerando escoamentos pluviais nas galerias e canais de modo que as vazões de pico atingem valores próximos à capacidade do sistema, resultando em inundações. A obtenção da chuva de projeto está relacionada à fixação do período de retorno (T) associado a um determinado risco e à duração da chuva crítica, para uma determinada área de drenagem. Poucas são as localidades nas quais

foram realizados estudos visando determinar as relações entre intensidade, duração e frequência. A variabilidade espacial dos dados de chuva pode incorrer em imprecisão na determinação da chuva de projeto [4].

Ademais, na ausência de informações, a equação pode auxiliar no planejamento de novas ocupações urbanas por meio da análise do incremento de vazão gerado pelas mudanças das superfícies.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo precípuo obter a equação de chuva intensa para o município de Rio Claro, SP, apresentando os métodos utilizados para a sua obtenção. A equação de chuva intensa do município de Piracicaba, SP, localizado a 30Km de Rio Claro, é também apresentada para fins de comparação.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Considerações Iniciais

Foram analisados os dados pluviométricos disponíveis nos quatro postos pertencentes à área do município, alguns com dados desde 1936, e disponíveis no banco de dados do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Preliminarmente, foram obtidas as séries de máximas alturas médias para chuva de 1 dia ( $h_{\text{dia,max}}$ ). Posteriormente, foram verificados os ajustes de distribuições teóricas de probabilidade aplicando os métodos de Foster e Gumbel e a distribuição LogNormal. Com o método probabilístico de Gumbel foram obtidas as chuvas  $h_{\text{dia,max}}$  para diferentes períodos de recorrência (2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos). A desagregação da chuva de 1 dia em chuvas de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos foi realizada a partir do Método das Relações das Durações. Com esses dados, para cada posto pluviométrico, foi determinada a equação de chuva intensa por meio de regressão não linear dos dados utilizando o algoritmo de MARQUARDT para ajuste dos parâmetros. Finalmente, os resultados foram comparados com a IDF de Piracicaba, SP.

A seguir são apresentados os métodos aplicados em cada etapa de obtenção da curva de intensidade-duração-frequência (IDF).

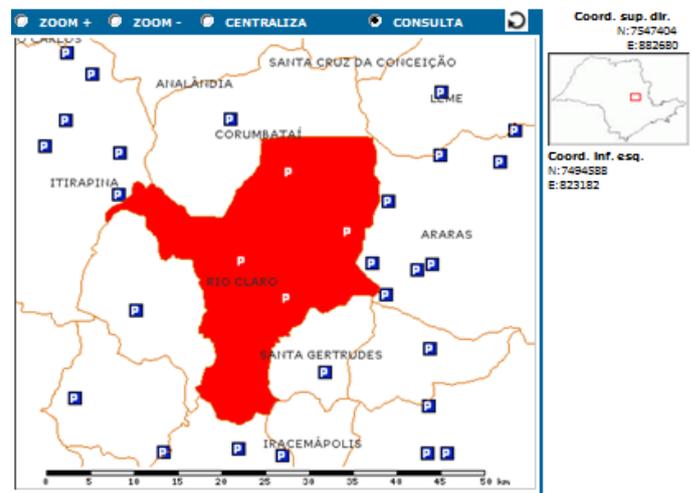
### 2.2 Séries de máximas médias diárias

As séries de máximas médias diárias ( $h_{\text{dia,max}}$ ) foram obtidas a partir da análise dos dados disponíveis em cada um dos postos pluviométricos

(prefixos D4-012; D4-016; D4-042 e D4-112-1). A Tabela 1 apresenta os dados dos postos pluviométricos analisados. A localização espacial dos postos no município de Rio Claro, SP pode ser observada na Figura 1.

**Tabela 1** - Dados dos postos pluviométricos analisados no município de Rio Claro, SP. Fonte: Ref. [8]

Posto/ Prefixo	Bacia	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Período de anos	No. de anos
D4-012	Rib Claro	600	22°17'	47°33'	1936- 2006	73
D4-016	Corum bataí	600	22°20'	47°29'	1953- 2006	54
D4-042	Corum bataí	670	22°17'	47°33'	1939- 1960	21
D4- 112-1	Rib. Claro	626,5	22°22'	47°36'	1995- 2004	10



**Figura 1** – Localização dos postos pluviométricos na área do município de Rio Claro, SP. Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH).

Com as séries de máximas foram ajustadas as funções de densidade teóricas.

### 2.3 Ajuste das funções de densidade de probabilidade

Foram avaliadas as seguintes funções de densidade de probabilidade: LogNormal, Pearson Tipo III e Gumbel (distribuição assintótica dos extremos do tipo I), as quais são representadas pelas Equações 1, 2 e 3, conforme reportado na literatura [4].

$$f_X(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma_y \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (1)$$

para  $x > 0$ . O valor esperado de  $X$  é dado por  $E[X] = \exp(\mu_y + \sigma_y^2/2)$  e a variância por

$VAR[X]=\exp(2\mu_Y+2\sigma_Y^2)-\exp(2\mu_Y+\sigma_Y^2)$ , sendo  $\sigma_Y$  o desvio padrão e  $\mu_Y$  o valor esperado para a variável aleatória Y.

$$f_X(x) = \frac{\lambda^n}{\Gamma(n)} \cdot (x - x_0)^{n-1} \cdot e^{-\lambda \cdot (x - x_0)} \quad (2)$$

para  $x \geq x_0$ . O valor esperado de X é dado por  $E[X]=x_0+n/\lambda$  e a variância,  $VAR[X]=n/\lambda^2$ , sendo  $\Gamma(n)$  a função da distribuição Gama.

$$f_Y(y) = \exp\left\{-\left(\frac{y-\alpha}{\beta}\right) - \exp\left[-\left(\frac{y-\alpha}{\beta}\right)\right]\right\} / \beta \quad (3)$$

para  $-\infty < y < \infty$ ,  $-\infty < \beta < \infty$  e  $\alpha > 0$ , com os parâmetros expressos por  $\beta = ((6)^{0,5}/\pi) \cdot (VAR[Y])^{0,5}$  e  $\alpha = E[Y] - 0,577x\beta$ , sendo VAR a variância e  $E[Y]$  o valor esperado de Y.

Cabe mencionar que o Método de Foster aplica, para os dados de vazão, a distribuição de Pearson tipo III [6]. O ajuste da obliquidade de Hazen foi aplicado ao coeficiente de obliquidade de Pearson. A avaliação do ajuste dos modelos probabilísticos foi realizada por meio do valor do coeficiente de determinação da reta representada pela graficação dos dados em escala bi-logarítmica, conforme proposto na literatura [5].

## 2.4 Obtenção da $h_{dia,max}$ e desagregação da chuva de 1 dia.

A obtenção da  $h_{dia,max}$  foi realizada empregando o Método de Gumbel para cada período de retorno (TR), sendo: 2, 5, 10, 20, 50, 100 e 500 anos. A desagregação da chuva de 1 dia em chuvas de 24h, 12h, 6h, 1h, 30 min, 25 min, 10 min, e 5 min foi realizada usando-se o Método das Relações das Durações. Este método baseia-se nas seguintes premissas: i) existe a tendência das curvas de probabilidade, correspondentes as diversas durações, de se manterem equidistantes e que; ii) para locais diferentes há grande similaridade nas relações entre intensidades médias máximas de diferentes durações [4]. A precipitação de duração diária corresponde ao valor compreendido entre os horários de observação pluviométrica, enquanto a precipitação de 24 horas é o maior valor de chuva correspondente a um período consecutivo de 24 horas [4]. Na ref. [5] pode-se verificar que as chuvas de 24 horas e de 1 dia guardam uma relação quase constante e independente do TR,

cujo valor é da ordem de 1,14, praticamente coincidente com o valor de 1,13 adotado pelo *U.S Weather Bureau*. As relações entre durações são obtidas segundo a expressão.

$$r \frac{t_1}{t_2} = \frac{\text{precipitação}_{t_1}}{\text{precipitação}_{t_2}} \quad (4)$$

A Tabela 2 apresenta os valores correspondentes às relações entre as durações utilizadas.

**Tabela 2** – Relação entre as durações. Fonte: Ref.[5] apud CETESB (1980)<sup>1</sup>.

	R
24h/1d	1,14
12h/24h	0,85
10h/24h	0,82
8h/24h	0,78
6h/24h	0,72
1h/24h	0,42
30min/1h	0,74
25min/30min	0,91
20min/30min	0,81
15min/30min	0,7
10min/30min	0,54
5min/30min	0,34

## 2.5 Obtenção da equação de chuvas intensas

A expressão dada pela Equação 4 é freqüentemente utilizada para exprimir a relação entre intensidade (I), duração (d) e freqüência de chuvas intensas, sendo a freqüência representada indiretamente pelo tempo de retorno T:

$$I = \frac{\beta_1 T^{\beta_2}}{(\beta_3 + d)^{\beta_4}} \quad (5)$$

onde os  $\beta_i$  são parâmetros ajustados por métodos de regressão não linear a partir dos dados pluviométricos desagregados conforme item 2.4.

Para a estimativa de parâmetros de modelos matemáticos do tipo  $\underline{Y} = f(\underline{X}, b)$ , o critério mais usual é o de mínimos quadrados, isto é, os parâmetros são ajustados de forma a minimizar a função  $\phi$  dada pela Equação 6.

$$\phi = \sum_{i=1}^n (y_{\text{exp},i} - y_{\text{calc},i})^2 w_i = [\underline{Y} - f(\underline{X}, b)]^T W [\underline{Y} - f(\underline{X}, b)] \quad (6)$$

<sup>1</sup> CETESB/DAEE. Drenagem Urbana: Manual de Projeto [por] Departamento de Águas e Energia Elétrica [e] Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2ª. Ed. Corrigida. São Paulo, 1980.

Conforme ref.[9], dentre os métodos que usam derivadas, o método de Newton-Gauss, ou Gauss-Seidel, baseia-se na linearização do modelo, por expansão em série de Taylor truncada nos termos de derivada primeira, ao redor da estimativa  $\underline{b}_0$ . A partir deste ponto a procura segue o seguinte algoritmo:

$$\underline{db}_{k+1} = \left( \underline{J}_k^T \underline{W} \underline{J}_k \right)^{-1} \left[ \underline{J}_k \underline{W} (\underline{Y} - \underline{f}(\underline{X}, \underline{b}_k)) \right] \quad (7)$$

$$\underline{b}_{k+1} = \underline{b}_k + g \underline{db}_{k+1}$$

onde  $k$  é o número da iteração,  $g$  é um fator de amortecimento e  $\underline{J}$  é a matriz jacobiana, cujos elementos são definidos como:

$$\underline{J}_k = \left( J_{i,j} \right)_k = \left( \frac{\partial f(x_i, \underline{b}_k)}{\partial b_j} \right) \quad (8)$$

O método de Gauss-Seidel corresponde à solução do sistema normal de equações não lineares pelo método de Newton-Raphson multivariável.

Outro método é o do gradiente, o qual se baseia na linearização da função objetivo  $\phi$  e cujo algoritmo tem a forma:

$$\underline{db}_{k+1} = \frac{[-\nabla \phi(\underline{b}_k)]}{\left[ \sum_{j=1}^p \left( -\frac{\partial \phi}{\partial b_j} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (9)$$

$$\underline{b}_{k+1} = \underline{b}_k + g \underline{db}_{k+1}$$

Enquanto o método de Gauss-Seidel mostra-se rápido e convergente para estimativas iniciais próximas da solução, podendo falhar para estimativas iniciais pobres de  $\underline{b}$ , o método do gradiente mostra-se efetivo longe da solução mas apresenta certas dificuldades próximo à solução em certas situações.

O método proposto pelo autor da ref.[10] apresenta um algoritmo que combina as direções de procura dos métodos de Gauss-Seidel e do gradiente.

$$\underline{db}_{k+1} = \left( \underline{J}_k^T \underline{W} \underline{J}_k - \lambda_k \underline{I} \right)^{-1} \left[ \underline{J}_k \underline{W} (\underline{Y} - \underline{f}(\underline{X}, \underline{b}_k)) \right] \quad (10)$$

$$\underline{b}_{k+1} = \underline{b}_k + g \underline{db}_{k+1}$$

onde  $\underline{I}$  é a matriz identidade e  $\lambda_k$  é um fator que adapta e controla a direção e o tamanho do passo. Para  $\lambda_k=0$  tem-se o método de Gauss-Seidel e para  $\lambda_k \rightarrow \infty$  tem-se o método do gradiente. O algoritmo para a mudança do valor de  $\lambda_k$  durante a procura pode ser resumido na forma:

- inicialmente toma-se  $\lambda_0=10^{-2}$  e  $v=(2 a 5)$ ;
- para a iteração  $k$ , tenta-se  $\lambda=\lambda_{k-1}/v$  e calcula-se  $\phi(\lambda)$ ;
- se  $\phi(\lambda) < \phi_{k-1}$ , então o passo é aceito, senão tenta-se sucessivamente  $\lambda=\lambda.v$  até que  $\phi(\lambda) < \phi_{k-1}$ , quando então a iteração é aceita.

## 2.6 Comparação dos resultados obtidos com a equação proposta e os obtidos com a equação de Piracicaba, SP.

A comparação da equação proposta com a equação de Piracicaba, SP justifica-se pela curta distância e diferença de altitude entre os dois municípios, sendo uma forma de avaliar a eficácia dos diferentes métodos empregados. Para tal, foram analisados os valores de correlação, covariância e coeficiente de determinação. O ajuste foi verificado por meio da curva de ajuste ideal.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os valores médios e máximos observados para as chuvas máximas de cada posto investigado.

**Tabela 3** - Valores médios e máximos observados para as chuvas máximas dos postos.

Posto	Média(mm)	Máxima(mm)
D4-012	73,6	120,2
D4-016	78,7	130,5
D4-042	72,5	150,1
D4-112-1	82,6	109,4

A maior média calculada foi obtida para o Posto D4-112-1 com 10 anos de registros de dados e o máximo registrado ficou em 150,1 mm para o Posto D4-042 com 21 anos de registro de dados. Cabe mencionar que o valor extremo de 450 mm verificado no ano de 1952 para o Posto D4-042 foi descartado.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os valores correspondentes às chuvas médias máximas para os postos estudados e os respectivos ajustes para as funções densidade de probabilidade utilizando os Métodos de Foster e Gumbel. Os resultados referentes ao ajuste usando a função LogNormal não foram apresentados por não ter fornecido um bom ajuste.

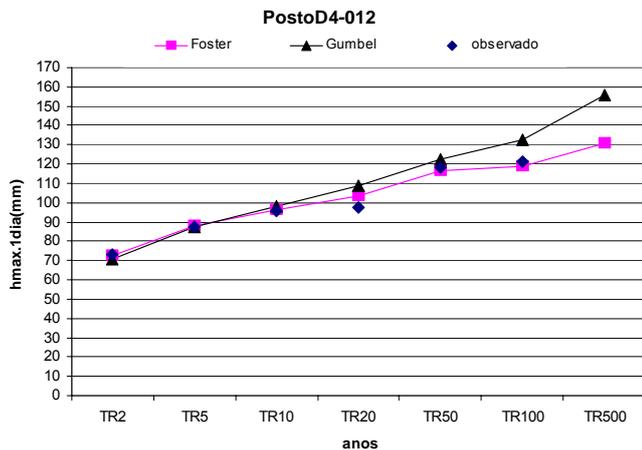


Figura 2 – Dados observados e ajuste das funções de probabilidade para o Posto D4-012.

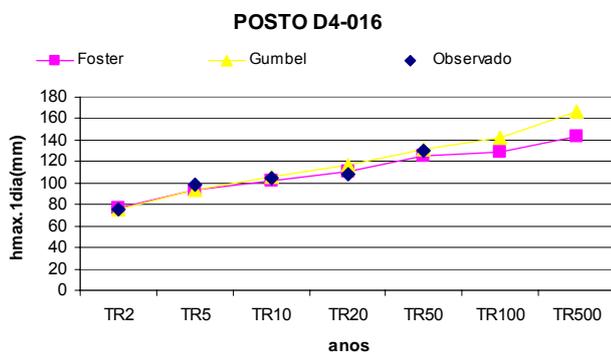


Figura 3 – Dados observados e ajuste das funções de probabilidade para o Posto D4-016.

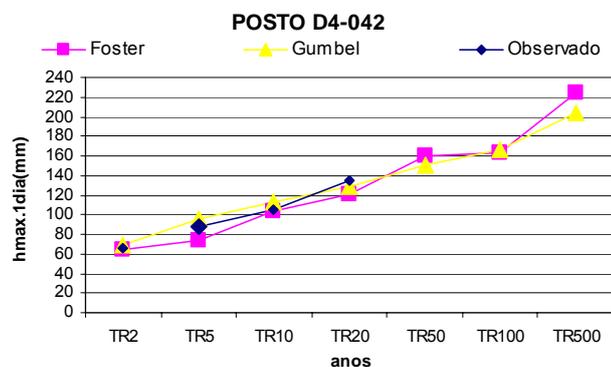


Figura 4 – Dados observados e ajuste das funções de probabilidade para o Posto D4-042.

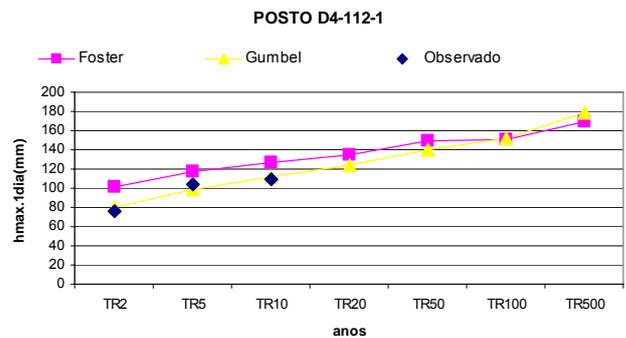


Figura 5 – Dados observados e ajuste das funções de probabilidade para o Posto D4-112-1.

O número de pontos observados para cada posto varia de acordo com o apresentado na Tabela 1. Conforme observado na ref.[6], as causas das diferenças entre os vários métodos são conceituais e qualquer extrapolação tem menos credibilidade quando o período de retorno (TR) é muito maior que o número de dados. A princípio não se pode eleger um método como melhor, todavia o Método de Gumbel é um dos mais aceitos.

Conforme mencionado, para avaliação do ajuste de modelos probabilísticos foi empregado o método gráfico. As Figuras 6, 7, 8 e 9 mostram o ajuste pelo Método dos Mínimos Quadrados dos pontos por retas quando estes são plotados em escalas bi-logarítmicas.

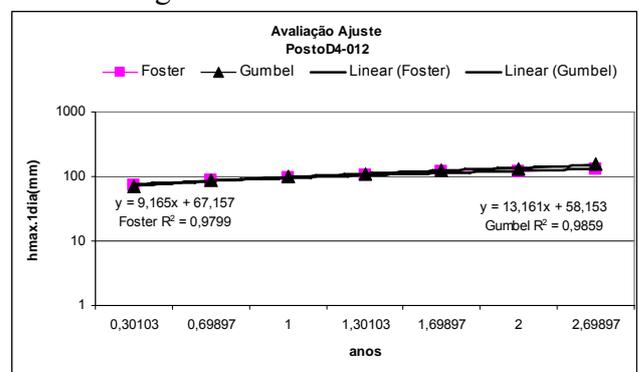


Figura 6 – Verificação do Ajuste da reta para o Posto D4-012.

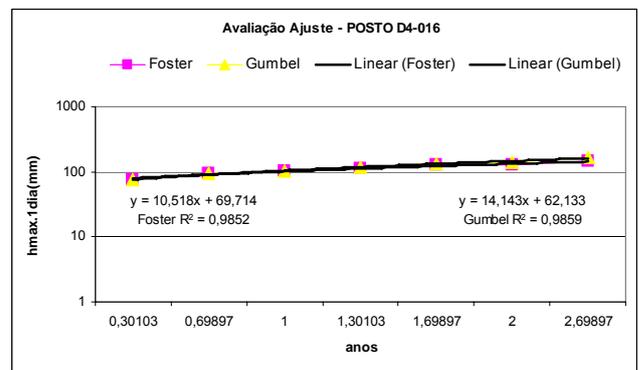
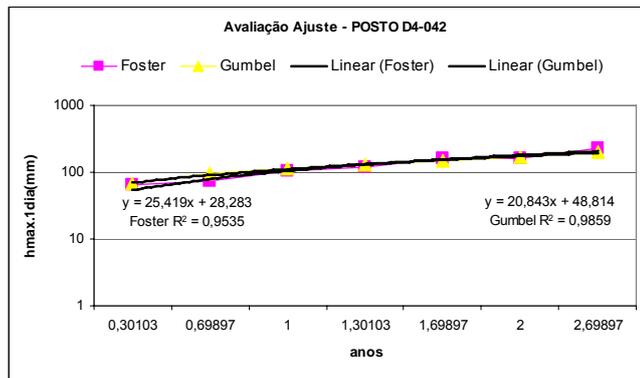
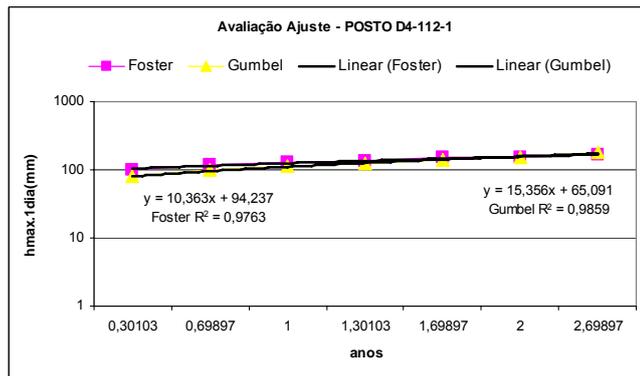


Figura 7 – Verificação do Ajuste da reta para o Posto D4-016.



**Figura 8** – Verificação do Ajuste da reta para o Posto D4-042.



**Figura 9** – Verificação do Ajuste da reta para o Posto D4-112-1.

Pela avaliação do coeficiente de determinação das retas ajustadas fica evidente que o Método de Gumbel formou uma tendência retilinear mais precisa quando comparada ao Método de Foster.

Sendo assim, as funções de densidade de probabilidade obtidas pelo Método de Gumbel foram utilizadas para gerar as chuvas máximas de 1 dia para diferentes períodos de retorno. A Tabela 4 apresenta os valores correspondentes das chuvas máximas diárias para diferentes períodos de recorrência nos quatro postos investigados.

**Tabela 4** – Chuvas máximas diárias (mm) geradas com o Método de Gumbel para diferentes períodos de retorno (TR).

TR	D4-012	D4-016	D4-042	D4-112-1
2	70,9	75,9	69,0	80,0
5	87,4	93,5	95,1	99,2
10	98,2	105,2	112,3	111,9
20	108,7	116,4	128,9	124,1
50	122,2	131,0	150,3	139,8
100	132,4	141,9	166,3	151,7
500	155,8	167,0	203,4	179,0

Para cada valor de chuva média máxima obtida foi aplicado o Método da Relação das Durações conforme os valores de  $r$ , apresentados na Tabela 2. Os resultados correspondentes as intensidades das chuvas ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) para diferentes durações e

período de retorno podem ser visualizados nas Tabelas 5, 6, 7 e 8.

**Tabela 5** – Valores de intensidade de chuva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) para o Posto D4-012 para diferentes durações (minutos) e período de retorno (TR em anos).

min.	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	TR500
5,0	102,5	126,3	142,0	157,1	176,7	191,3	225,2
10,0	81,4	100,3	112,8	124,8	140,3	151,9	178,8
15,0	70,4	86,7	97,5	107,8	121,3	131,3	154,5
20,0	61,1	75,2	84,6	93,6	105,2	114,0	134,1
25,0	54,9	67,6	76,0	84,1	94,6	102,4	120,5
30,0	50,3	61,9	69,6	77,0	86,6	93,8	110,4
60,0	34,0	41,8	47,0	52,0	58,5	63,4	74,6
360,0	9,7	12,0	13,4	14,9	16,7	18,1	21,3
480,0	7,9	9,7	10,9	12,1	13,6	14,7	17,3
600,0	6,6	8,2	9,2	8,2	11,4	12,4	14,6
720,0	5,7	7,1	7,9	8,8	9,9	10,7	12,6
1440,0	3,4	4,1	4,7	5,2	5,8	6,3	7,4

**Tabela 6** – Valores de intensidade de chuva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) para o Posto D4-016 para diferentes durações (minutos) e período de retorno (TR em anos).

min.	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	TR500
5,0	109,7	135,2	152,1	168,3	189,3	205,1	241,5
10,0	87,1	107,4	120,8	133,7	150,4	162,9	191,8
15,0	75,3	92,8	104,4	115,5	129,9	140,7	165,7
20,0	65,3	80,5	90,6	100,3	112,8	122,1	143,8
25,0	58,7	72,4	81,4	90,1	101,4	109,8	129,3
30,0	53,8	66,3	74,6	82,5	92,8	100,5	118,4
60,0	36,3	44,8	50,4	55,8	62,7	67,9	80,0
360,0	10,4	12,8	14,4	15,9	17,9	19,4	22,9
480,0	8,4	10,4	11,7	12,9	14,6	15,8	18,6
600,0	7,1	8,7	9,8	8,7	12,2	13,3	15,6
720,0	6,1	7,6	8,5	9,4	10,6	11,5	13,5
1440,0	3,6	4,4	5,0	5,5	6,2	6,7	7,9

**Tabela 7** – Valores de intensidade de chuva ( $\text{mm.h}^{-1}$ ) para o Posto D4-042 para diferentes durações (minutos) e período de retorno (TR em anos).

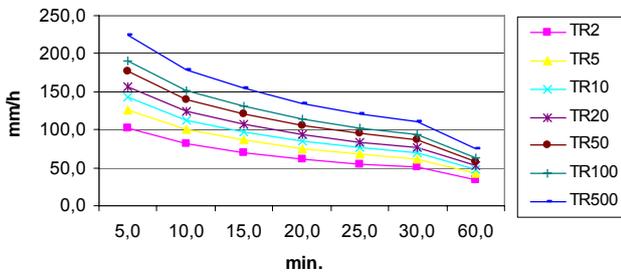
min.	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	TR500
5,0	99,8	137,4	162,4	186,3	217,2	240,4	294,1
10,0	79,3	109,1	128,9	147,9	172,5	190,9	233,5
15,0	68,5	94,3	111,4	127,8	149,1	165,0	201,8
20,0	59,4	81,9	96,7	110,9	129,4	143,2	175,1
25,0	53,4	73,6	86,9	99,7	116,3	128,7	157,4
30,0	48,9	67,4	79,6	91,3	106,5	117,9	144,1
60,0	33,1	45,5	53,8	61,7	72,0	79,6	97,4
360,0	9,4	13,0	15,4	17,6	20,6	22,8	27,8
480,0	7,7	10,6	12,5	14,3	16,7	18,5	22,6
600,0	6,5	8,9	10,5	8,9	14,0	15,5	19,0
720,0	5,6	7,7	9,1	10,4	12,1	13,4	16,4
1440,0	3,3	4,5	5,3	6,1	7,1	7,9	9,7

**Tabela 8** – Valores de intensidade de chuva (mm.h<sup>-1</sup>) para o Posto D4-112-1 para diferentes durações (minutos) e período de retorno (TR em anos).

min.	TR2	TR5	TR10	TR20	TR50	TR100	TR500
5,0	115,6	143,4	161,7	179,3	202,2	219,2	258,8
10,0	91,8	113,8	128,4	142,4	160,5	174,1	205,5
15,0	79,4	98,4	111,0	123,1	138,7	150,5	177,6
20,0	68,9	85,4	96,3	106,8	120,4	130,6	154,1
25,0	61,9	76,7	86,6	96,0	108,2	117,4	138,5
30,0	56,7	70,3	79,3	87,9	99,1	107,5	126,8
60,0	38,3	47,5	53,6	59,4	67,0	72,6	85,7
360,0	10,9	13,6	15,3	17,0	19,1	20,7	24,5
480,0	8,9	11,0	12,4	13,8	15,5	16,9	19,9
600,0	7,5	9,3	10,5	9,3	13,1	14,2	16,7
720,0	6,5	8,0	9,0	10,0	11,3	12,2	14,5
1440,0	3,8	4,7	5,3	5,9	6,6	7,2	8,5

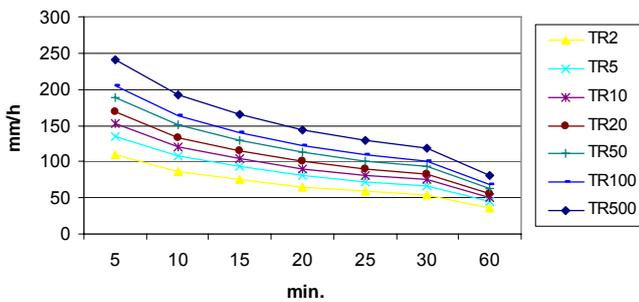
As curvas correspondentes a cada posto podem ser observadas nas Figuras 10,11, 12 e 13.

IDF-Posto D4-012



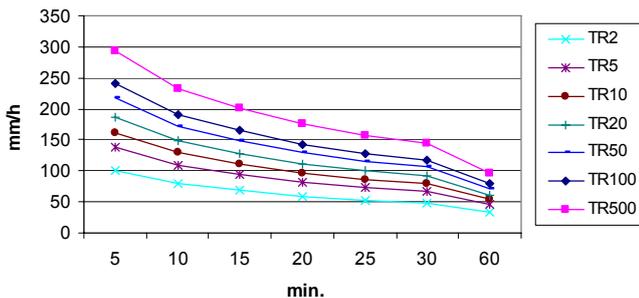
**Figura 10** – Curva I.D.F obtida para o Posto D4-012.

IDF-Posto D4-016



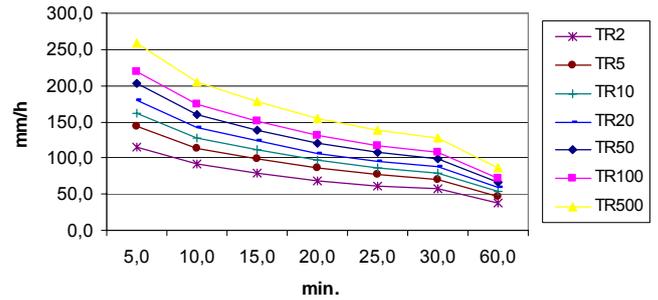
**Figura 11** – Curva I.D.F obtida para o Posto D4-016.

IDF-Posto D4-042



**Figura 12** – Curva I.D.F obtida para o Posto D4-042.

IDF-Posto D4-112-1



**Figura 13** – Curva I.D.F obtida para o Posto D4-112-1.

Para a obtenção da equação de chuva foi aplicado o ajuste não linear aos valores apresentados nas Tabelas de 5 a 8 limitadas a duração de 60 minutos.

Os parâmetros da equação IDF para o município de Rio Claro foram ajustados utilizando-se o Método de Marquardt (ref.[10]) e os valores estimados e respectivos desvios-padrão são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** – Valores estimados dos parâmetros  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  e  $\beta_4$ , e respectivos desvios-padrão.

Parâmetro	Valor Estimado	Coefficiente de Variação (%)
$\beta_1$	560,88 ± 150,65	26,86
$\beta_2$	0,14122 ± 0,0036692	2,60
$\beta_3$	7,4587 ± 2,1128	28,33
$\beta_4$	0,64967 ± 0,065052	10,01

Conforme se observa na Tabela 9, os maiores coeficientes de variação são verificados para os parâmetros  $\beta_1, \beta_3$  e  $\beta_4$ , sugerindo existir uma interação entre esses parâmetros, isto é, influência mútua entre as suas estimativas. Interação entre parâmetros significa que, se um parâmetro é mal estimado (grande desvio-padrão), outro também o será, mesmo que o efeito combinado destas más estimativas possa levar a previsões razoavelmente boas do modelo. De fato, a matriz de correlação dos parâmetros estimados, cujos elementos estão apresentados na Tabela 10, mostra que as estimativas dos parâmetros  $\beta_1, \beta_3$  e  $\beta_4$  estão fortemente correlacionadas entre si.

**Tabela 10** – Elementos da matriz de correlação dos parâmetros estimados

	1	2	3	4
1	1,000	-0,0556	0,985	0,996
2	-0,0556	1,000	-1,070x10 <sup>-12</sup>	-1,099x10 <sup>-12</sup>
3	0,985	-1,070x10 <sup>-12</sup>	1,000	0,974
4	0,996	-1,099x10 <sup>-12</sup>	0,974	1,000

Com relação aos valores estimados para os parâmetros, verifica-se que os mesmos estão dentro de intervalos comumente reportados na literatura para este tipo de equação.

Considerando os parâmetros obtidos na regressão não linear, a equação de chuvas intensas para o município de Rio Claro, SP pode ser escrita sob a forma da Equação 11.

$$I = \frac{560,9.T^{0,141}}{(7,4 + d)^{0,65}} \quad (11)$$

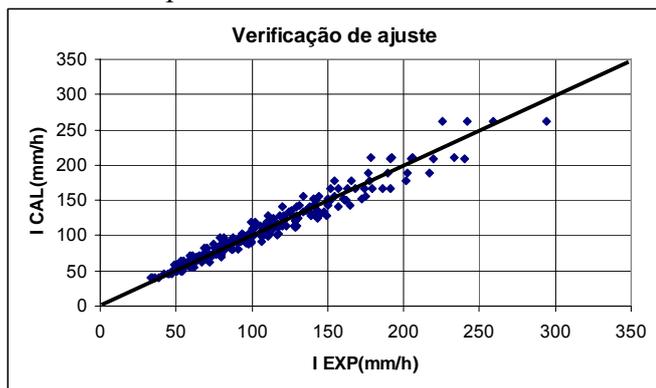
onde:

$I$ = intensidade de chuva ( $\text{mm.h}^{-1}$ )

$T$ = período de retorno (anos)

$d$ = duração da chuva (minutos)

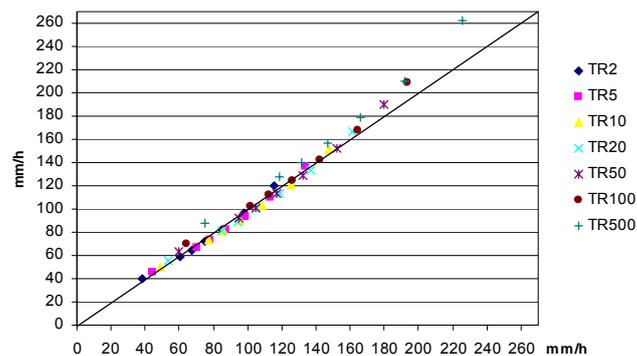
A Figura 14 apresenta a distribuição dos pontos ( $I_{exp}$ ,  $I_{cal}$ ) em torno da reta  $I_{cal}=I_{exp}$  como uma forma de verificar a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais.



**Figura 14** – Verificação do ajuste perfeito dos valores observados e calculados a partir da I.D.F proposta para Rio Claro, SP.

O ajuste dos valores de intensidade de chuva, calculados e observados, por meio de regressão linear forneceu o valor de 0,95 para o coeficiente de explicação com intercepto na origem e sua projeção foi coincidente com a reta de ajuste perfeito ( $I_{exp}$ ,  $I_{cal}$ ). Todavia, pode-se visualizar na Figura 14, uma maior dispersão dos pontos em torno da reta ideal para valores de intensidade de chuva superiores a  $150 \text{ mm.h}^{-1}$ .

Adicionalmente, os resultados apresentados na Figura 15 mostram a relação entre os valores de intensidade de chuva obtidos com a equação de Piracicaba conforme ref.[3] e aqueles obtidos com a equação proposta para Rio Claro, SP.



**Figura 15** – Curva de comparação de valores de intensidade de chuva obtidos a partir da equação I.D.F de Piracicaba e da equação I.D.F proposta para Rio Claro, SP.

Analisando-se a Figura 15, verifica-se uma coincidência entre os valores obtidos com as duas equações, comprovadas por meio da correlação entre os valores de intensidade de chuva calculados pelas equações (0,99) e por meio dos coeficientes de determinação das retas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados ( $R^2 > 0,98$ ) com intercepto na origem, calculados para cada período de retorno em diferentes durações de chuva. Entretanto, verifica-se um afastamento dos pontos em relação à reta de  $45^\circ$  para valores de TR de 100 e 500 com durações de chuva superiores a 60 minutos, sendo recomendada, por precaução, a utilização criteriosa da equação proposta para o caso dessas exceções.

Considerando que a equação de Piracicaba foi obtida por meio de tratamento de dados pluviográficos [3], conforme recomendado na literatura, e considerando ainda a concordância com os valores obtidos por meio da equação proposta para Rio Claro a qual foi obtida por meio da desagregação da chuva média máxima de 1 dia ( $h_{\text{dia,max.}}$ ), a coincidência sugere que na impossibilidade de acesso a dados pluviográficos, os dados pluviométricos possam ser empregados com boa aproximação para a estimativa dos parâmetros da equação de chuvas intensas.

Evidentemente, para cada período de retorno e vida útil da obra drenagem existe a probabilidade de que este evento seja alcançado ou superado. Assim, definiu-se o risco associado a  $n$  períodos de tempo. A Figura 16 apresenta a relação entre essas variáveis.

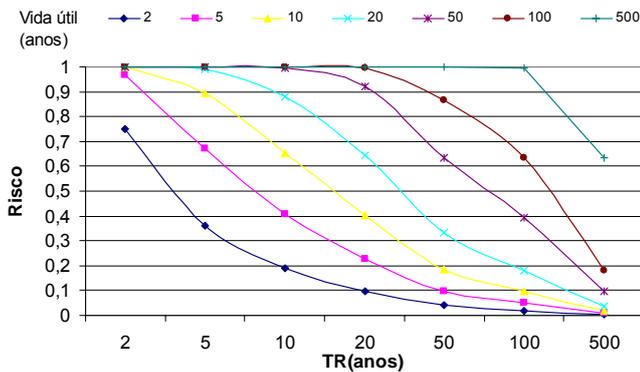


Figura 16 – Risco em função da vida útil e do período de retorno.

#### 4. BREVES CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA APLICAÇÃO

A equação proposta pode ser utilizada para obtenção da vazão de projeto no dimensionamento de sistemas de microdrenagem, tais como: sarjetas; bocas-de-lobo e galerias ou mesmo obras de macrodrenagem. Para tal, deve-se adotar o período de retorno e duração convenientes para cada aplicação, de acordo com o risco assumido. De posse do valor da intensidade de chuva pode-se empregar a equação do Método Racional para a obtenção da vazão de projeto:  $Q=C.I.A$ , onde  $Q$  é a vazão de projeto em L/hora;  $C$  é o coeficiente de escoamento superficial;  $I$  é a intensidade obtida em  $\text{mm.h}^{-1}$  e  $A$  é a área de projeção horizontal da bacia em  $\text{m}^2$ .

No caso do dimensionamento de instalações prediais de águas pluviais a área de interceptação deve obedecer à direção da chuva, conforme ref. [7].

Adicionalmente, pode-se obter o hidrograma resultante da precipitação excedente propagado a partir de um modelo de conversão chuva-vazão. Nesse caso, deve-se levar em conta que o hietograma de projeto gerado a partir da IDF deve ser desagregado e reordenado convenientemente, de acordo com o tipo de precipitação predominante.

A obtenção de hietogramas gerados a partir das curvas IDF pode ser bastante útil a projetista na avaliação do incremento do escoamento gerado pela mudança no uso e ocupação do solo, constituindo importante ferramenta de planejamento de espaços urbanos. Todavia, cabe mencionar que, devido a metodologia empregada na obtenção da equação, este método pode maximizar as precipitações, pois dificilmente os

totais precipitados máximos ocorrerão em um único evento, conforme observado na ref.[1].

#### 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir:

Os métodos empregados para a obtenção da equação que relaciona a intensidade, duração e frequência de chuvas intensas proposta para o município de Rio Claro podem ser aplicados em outras localidades que não possuem dados pluviográficos.

O Método de Gumbel foi mais adequado para o ajuste da função densidade de probabilidade dos quatro postos pluviométricos investigados.

A equação proposta para Rio Claro, SP empregando regressão não linear pelo Método de Marquardt apresentou ajuste com coeficiente de determinação de 0,95 (obtido através do Método dos Mínimos Quadrados) e projeção coincidente a reta de ajuste perfeito, considerando os dados ajustados segundo a função de densidade de probabilidade ajustada empregando o método de Gumbel.

A comparação dos valores de intensidade de chuva obtidos com a equação proposta e aqueles obtidos com a equação de Piracicaba (ref.[3]) mostraram que existe uma forte correlação entre os valores de intensidade (0,997) bem como um coeficiente de determinação de 0,98 para a reta coincidente com a reta de ajuste perfeito.

Considerando as afirmações acima bem como àquelas referentes às limitações inerentes as hipóteses simplificadoras dos diferentes métodos empregados, verificou-se que a equação proposta pode ser utilizada na quantificação de chuvas intensas em projetos de engenharia para o município de Rio Claro, SP.

Embora os resultados apresentados tenham mostrado estabilidade e representatividade frente aos dados ajustados, recomenda-se prudência do projetista na adoção de valores associados a durações maiores que uma hora e períodos de retorno superiores a 100 anos.

Por fim, recomenda-se a verificação dos parâmetros da equação proposta utilizando dados de postos pluviográficos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) pelo fornecimento de alguns dos dados e aos Professores Sérgio dos Anjos e Jefferson Nascimento pelas contribuições ao trabalho.

## REFERÊNCIAS

1. Canholi, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 301p.
2. CETESB. *Drenagem Urbana: manual de projeto*. São Paulo, SP. 476 p.
3. DAEE – Departamento de águas e energia elétrica. *Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo*. Secretaria de recursos hídricos, saneamento e obras. Centro tecnológico de hidráulica e recursos hídricos. Convênio Departamento de Águas e Energia Elétrica e Escola Politécnica da Universidade
4. Righetto, A.M. *Hidrologia e recursos hídricos*. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840p.
5. Tucci, C.E.M (org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 3ed. Porto Alegre. Editora da UFRGS. ABRH, 2002.
6. Villela, S.M., Mattos, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo, SP. McGraw-Hill do Brasil, 1975.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *Instalações prediais de águas pluviais*. NBR-10844, 1988.
8. Sistema de Gerenciamento Integrado em Recursos Hídricos (SIGRH). Disponível em: [http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh\\_index.exe?lwgactw=5.38927521471122](http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_index.exe?lwgactw=5.38927521471122). acesso em 17 de março de 2009.
9. Himmelblau, D. M. *Process analysis by statistical methods*. New York: John Wiley, 1970.
10. Marquardt, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Indust. Appl. Math.*, v. 11, n. 2, p. 431-441, 1963.